

IAHR

AIHH

**XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA  
BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBRE DE 2018****UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA ENSINO NA ÁREA DE  
MODELAGEM ECOLÓGICA DE COMUNIDADES AQUÁTICAS**

**Leonardo Facini Fernandes, Juan Martín Bravo, Juan Carlos Ticoná, Lúcia Helena Ribeiro  
Rodrigues, David da Motta Marques**

*Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil*  
*leonardo.facini@gmail.com; jumarbra@iph.ufrgs.br ; juancarlos.ticonag@gmail.com;*  
*lucia.rodrigues@ufrgs.br; dmm@iph.ufrgs.br*

**RESUMO:**

As disciplinas na área de ecologia e limnologia apresentam conteúdos relacionados a comunidades aquáticas e sua estrutura. Estes conteúdos são encontrados em grande número de bibliografias sendo o objetivo deste trabalho apresentar um modelo educacional para auxiliar o estudo de fenômenos facilitando a compreensão dos conteúdos. O modelo permite ao aluno ou usuário testar facilmente diferentes cenários, parametrizações, e visualizar em tempo real a consequência de cada alteração induzida no ecossistema. O modelo foi denominado EcoAula-IPH, sendo representados os principais constituintes da cadeia trófica em comunidades aquáticas: fitoplâncton, zooplâncton, peixe zooplânctívoro, peixe onívoro e peixe piscívoro. O programa utiliza como dados de entrada séries temporais de cinco variáveis: oxigênio dissolvido, temperatura da água, luz, concentrações de nitrogênio e fósforo, e simula a evolução das interações dos constituintes em um tanque retangular estanque. Diferentes aplicações foram avaliadas como por exemplo, preferência de cardumes de peixes por regiões favoráveis em função da resposta funcional, influência da temperatura no crescimento da biomassa de fitoplâncton e comportamento presa-predador. Em todas as aplicações, o modelo mostrou de forma condizente os resultados esperados, se apresentando como uma ferramenta didática, de uso público, e fácil de utilizar, com grande potencial de ser utilizada em salas de aula em disciplinas da área de recursos hídricos e ecologia.

**ABSTRACT:**

The ecology and limnology courses have several contents related to aquatic communities and their structure. These contents are found in a large number of bibliographies and the objective of this work is to present an educational model to help the study of these topics. The developed model allows the student or other user to easily assess different scenarios, parameterizations, and visualize in real-time the consequences of each induced modification on the ecosystem. The model was called EcoAula-IPH and was represented the main constituents of the trophic level in aquatic communities: phytoplankton, zooplankton, planktivorous fishes, omnivorous fishes and piscivorous fishes. The program uses as input data the time series of five variables: dissolved oxygen, water temperature, light, nitrogen and phosphorus concentration, and simulates the evolution of the interactions of the constituents in a rectangular pond. Different applications were evaluated, as for example, fishery preference for favorable habitat regions, temperature influence on phytoplankton biomass growth and prey-predator behavior. In all applications, the model showed the expected results in a suitable way, presenting itself as a didactic tool of public use, and easy to use, with remarkable potential to be used in classrooms.

**PALAVRAS-CHAVES:** Modelo educacional; Modelagem comunidades aquáticas; Modelagem baseada em agentes.

## INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de ferramentas educacionais permite a difusão do conhecimento e facilita o entendimento de princípios ou fenômenos complexos. Na área de ecologia de comunidades aquáticas, os processos biológicos de grupos de organismos e suas interações na comunidade aquática são conceitos apresentados em diferentes disciplinas de cursos das engenharias (e.g. Civil, Ambiental, Recursos Hídricos), Ecologia, Agronomia, Zootecnia. A modelagem matemática em ecologia utiliza diferentes abordagens, entretanto os modelos de simulação que descrevem organismos individuais ou, em geral, "agentes", se tornaram uma ferramenta amplamente utilizada (DeAngelis e Mooij, 2005; Grimm, 1999; Grimm e Railsback, 2005; van Winkle et al., 1993).

Os modelos baseados em indivíduos (MBIs) são mais adequados para lidar com a variabilidade individual que é tão importante nestas comunidades (van Nes et al., 2003). No entanto, a utilização de MBIs na modelagem de comunidades aquáticas pode resultar inviável pelo excessivo esforço computacional para representar o grande número de indivíduos (Hellweger, 2008). Alternativamente existem os modelos baseados em super-indivíduos (MBSI) que avaliam os efeitos de grupos ou classes de organismos sobre a dinâmica populacional. A unidade básica do MBSI é um super-indivíduo, entendido como uma classe de organismos similares de acordo com um ou vários critérios ecológicos. A abordagem de super-indivíduos é uma ferramenta poderosa quando se trata de reduzir a carga computacional de executar MBIs complexos, mantendo uma alta precisão (Scheffer et al., 1995).

Nesse trabalho é apresentado um MBSI e um conjunto de aplicações para demonstrar a capacidade de explorar conceitos de dinâmica de comunidades aquáticas em forma didática para alunos de graduação de diferentes cursos.

## OBJETIVO

Analisar a utilidade de uma ferramenta computacional na área de modelagem ecológica de ecossistemas aquáticos para auxílio à compreensão dos conceitos ou fenômenos representados em sala de aula em disciplinas de graduação.

## O MODELO ECOAULA-IPH

O modelo EcoAula-IPH (Fernandes et al., *submetido*) foi desenvolvido no software livre NetLogo, específico para o desenvolvimento de simulações baseadas em agentes de fenômenos naturais e sociais.

Cinco grupos em comunidades aquáticas foram representados como super-indivíduos: fitoplâncton, zooplâncton e peixes zooplancívoros, onívoros e piscívoros. O programa utiliza como dados de entrada séries temporais de cinco variáveis: oxigênio dissolvido, temperatura, radiação solar, nitrogênio e fósforo e simula a evolução das concentrações de cada grupo em um tanque retangular estanque. Enquanto o fitoplâncton e o zooplâncton foram simulados com uma representação de autômatos celulares em uma rede de 100 células quadradas, os grupos de peixes foram representados por super-indivíduos cujos movimentos são definidos por gradientes de índices de adequabilidade de habitat calculados em cada intervalo de tempo para as células vizinhas à localização atual do agente. A estimativa da taxa de crescimento ou decaimento das biomassas é baseada na equação de Lotka-Volterra modificada para lidar com múltiplos organismos.

Duas alternativas para o cálculo de índice de adequabilidade de habitat foram incluídas no modelo, como apresentado, por exemplo, em Dueri et al. (2012): Método aditivo, onde a resposta funcional dos peixes sob a influência de cada uma das variáveis é somada para obter o valor do índice em cada célula do modelo e, o Método multiplicativo, onde cada resposta funcional é

multiplicada pelas restantes na estimativa do valor do índice em cada célula do modelo. Os plugs existentes nessas expressões (equação 1 e equação 2) permitem ao usuário ativar ou desativar a percepção de algumas das variáveis, enquanto que os valores dos expoentes permitem aumentar ou diminuir a importância da variável na tomada de decisão do peixe.

$$IAH_{A_i} = p_{luz} * I_{luz_i}^{exp_{luz}} + p_{tem} * I_{tem_i}^{exp_{tem}} + p_{OD} * I_{OD_i}^{exp_{OD}} + p_{Pred} * I_{Pred_i}^{exp_{Pred}} + p_{Pres} * I_{Pres_i}^{exp_{Pres}} \quad [1]$$

$$IAH_{M_i} = p_{luz} * I_{luz_i}^{exp_{luz}} * p_{tem} * I_{tem_i}^{exp_{tem}} * p_{OD} * I_{OD_i}^{exp_{OD}} * p_{Pred} * I_{Pred_i}^{exp_{Pred}} * p_{Pres} * I_{Pres_i}^{exp_{Pres}} \quad [2]$$

onde:  $IAH_{A_i}$  é o valor do índice de adequabilidade de habitat aditivo na célula  $i$ ,  $IAH_{M_i}$  é o valor do índice de adequabilidade de habitat multiplicativo na célula  $i$ ,  $p_{luz}$  é o plug que permite ativar (valor 1) ou desativar (elimina termo da equação) a percepção da luz,  $I_{luz}$  é o valor (entre 0 e 1) da resposta funcional dos indivíduos à iluminação,  $exp_{luz}$  é o valor do expoente no termo da luz (valor maior ou igual que um),  $p_{tem}$  é o plug que permite ativar (valor 1) ou desativar (elimina termo da equação) a percepção da temperatura da água,  $I_{tem}$  é o valor (entre 0 e 1) da resposta funcional dos indivíduos à temperatura da água,  $exp_{tem}$  é o valor do expoente no termo da temperatura da água (valor maior ou igual que um),  $p_{OD}$  é o plug que permite ativar (valor 1) ou desativar (elimina termo da equação) a percepção do oxigênio dissolvido,  $I_{OD}$  é o valor (entre 0 e 1) da resposta funcional dos indivíduos ao oxigênio dissolvido,  $exp_{OD}$  é o valor do expoente no termo do oxigênio dissolvido (valor maior ou igual que um),  $p_{Pred}$  é o plug que permite ativar (valor 1) ou desativar (elimina termo da equação) a percepção de predadores e permitir a fuga da presa,  $I_{Pred}$  é o valor (entre 0 e 1) da resposta funcional dos indivíduos à presença de predadores,  $exp_{Pred}$  é o valor do expoente no termo de percepção de predadores (valor maior ou igual que um),  $p_{Pres}$  é o plug que permite ativar (valor 1) ou desativar (elimina termo da equação) a percepção de presas,  $I_{Pres}$  é o valor (entre 0 e 1) da resposta funcional dos indivíduos à presença de presas,  $exp_{Pres}$  é o valor do expoente no termo de percepção de presas (valor maior ou igual que um),

O EcoAula-IPH apresenta uma interface gráfica amigável (Figura 1) onde o usuário pode ajustar diversos parâmetros da simulação, e.g., o número de super-indivíduos existentes associados a peixes, a biomassa inicial de cada um deles, biomassa inicial de fitoplâncton e zooplâncton, a percepção dos peixes para diversos fatores que influenciam a tomada de decisão enquanto locomoção. Os resultados são apresentados em animações da movimentação dos grupos de peixes e em gráficos de evolução temporal de concentrações.

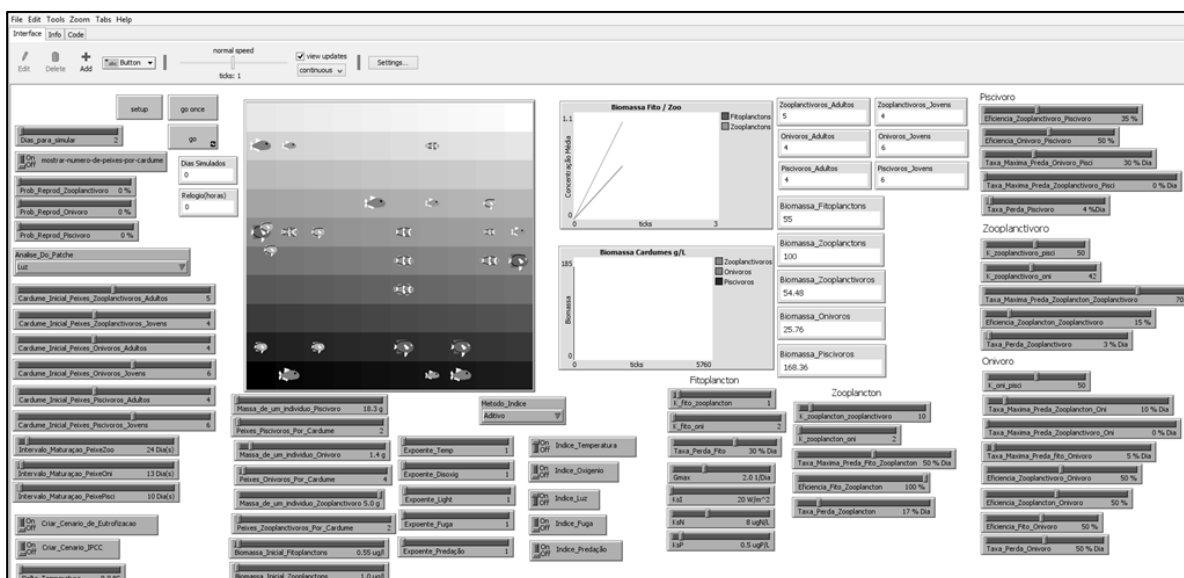


Figura 1.- Interface do modelo EcoAula-IPH

## APLICAÇÕES DO MODELO ECOAULA-IPH

Cinco aplicações do modelo EcoAula-IPH são apresentadas a seguir para demonstrar a aplicabilidade do modelo na apresentação de diversos conteúdos relacionados a comunidades aquáticas em disciplinas de cursos de graduação.

Em todas as aplicações foi considerado um intervalo de tempo de 15 segundos.

A primeira aplicação considerou verificar a movimentação de peixes na coluna líquida em uma situação de estratificação térmica, onde na superfície (epilímnio) a água apresenta temperatura maior que na região do fundo (hipolímnio). Para a simulação, a temperatura da água variou de 18°C (células no fundo) até 22,5°C (células na superfície) se mantendo constante em cada célula ao longo do período. A resposta funcional dos peixes considerou apenas a temperatura da água com base na curva apresentada na Figura 2, que define a temperatura de 20°C como a situação ideal.

A segunda aplicação considerou verificar o aumento de biomassa fitoplanctônica com o aumento da temperatura da água. Nesse sentido foi feita uma simulação considerando temperatura atual de 20°C ao longo de um período de dois dias sem considerar predação. Na sequência cinco simulações foram feitas aumentando o valor da temperatura atual em 0,5; 1; 1,5; 3 e 5°C mantendo os restantes parâmetros igual à simulação do período atual, no período de tempo de dois dias.

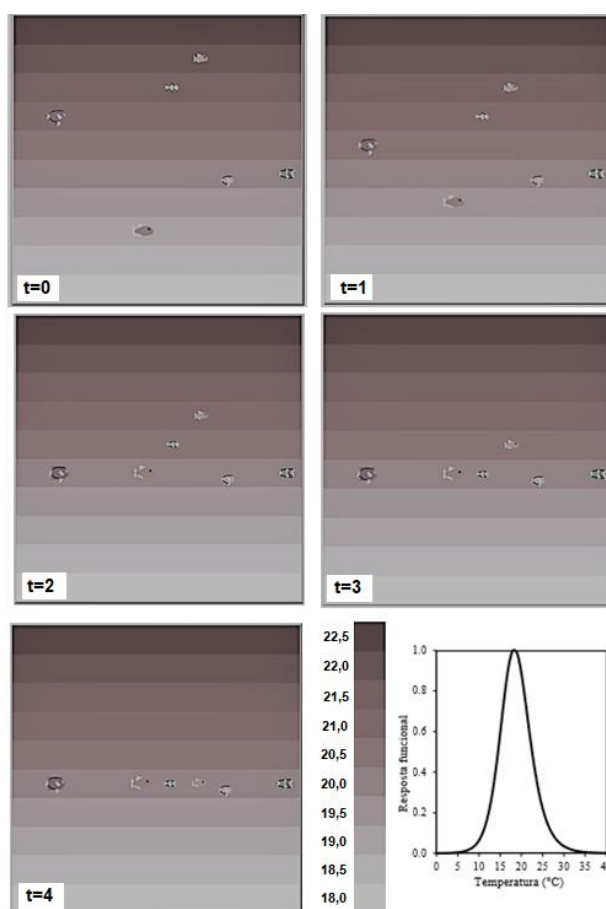
A terceira aplicação apresentou o comportamento presa-predador ao considerar na estimativa do índice de adequabilidade de habitat apenas ativos os plugs de percepção de predadores e de percepção de presas, considerando a presença de todos os grupos de peixes, fitoplâncton e o zooplâncton. Nesta aplicação outras variáveis do ambiente não influenciam a tomada de decisão dos peixes, que apenas se baseia na percepção de alimento (células com maior quantidade são preferidas) ou na presença de predadores (células com predadores não são escolhidas).

A quarta e quinta aplicações mostram a diferença resultante na movimentação dos peixes em função da escolha do método de cálculo do índice de adequabilidade de habitat, pelo método aditivo (quarta aplicação) e pelo método multiplicativo (quinta aplicação). Em ambos os casos foram considerados ativos os plugs das variáveis: temperatura da água, percepção de predadores e percepção de presas. O valor dos expoentes adotados nas três variáveis foi a unidade.

## RESULTADOS

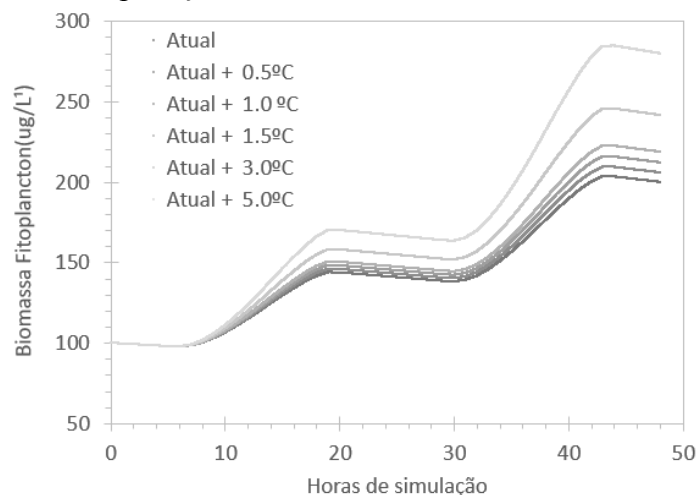
A Figura 2 mostra o resultado da movimentação dos peixes considerando na resposta funcional apenas a temperatura da água (Aplicação 1). Os peixes direcionam-se para a parte central

do sistema no decorrer do tempo, onde encontram valores de temperatura de água mais propícios para sua subsistência e desenvolvimento, conforme a curva de resposta funcional.



**Figura 2.-** Resultados da movimentação de peixes considerando apenas o campo de temperatura da água e a curva de resposta funcional indicada.

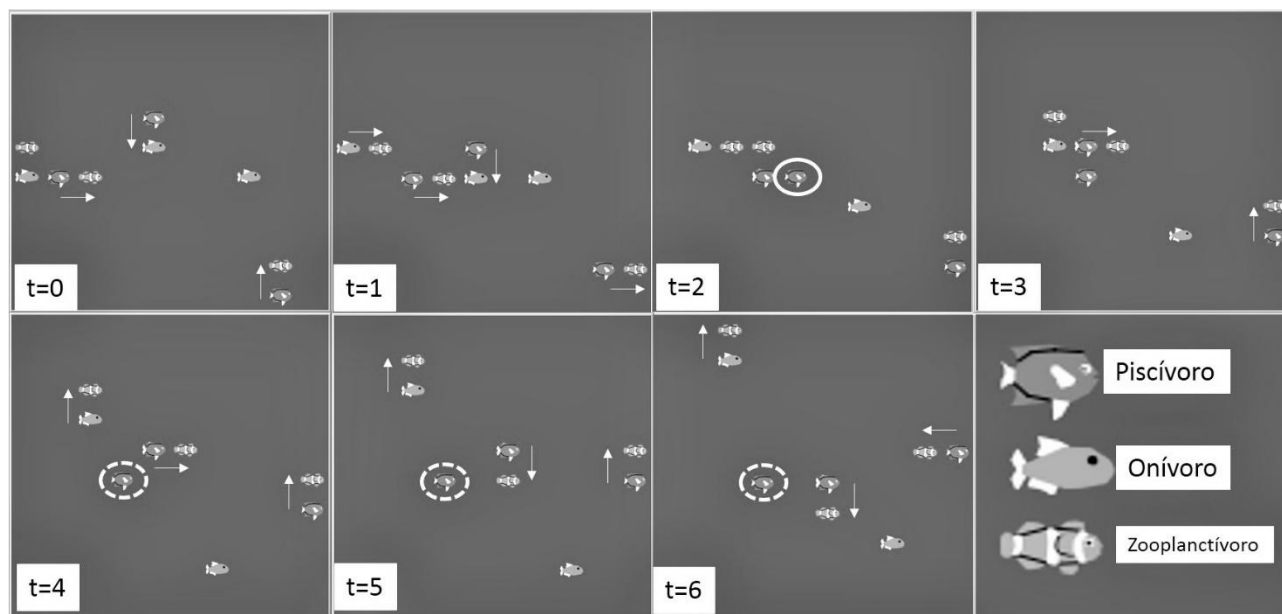
Por sua vez, a Figura 3 mostra a evolução da biomassa fitoplanctônica no sistema ao longo de dois dias de simulação considerando valores de temperatura da água crescente e sem considerar a predação (Aplicação 2). Para o valor de temperatura atual, a biomassa fitoplanctônica praticamente duplica ao longo de dois dias na ausência de predação. Conforme se observa na Figura 3, valores crescentes de temperatura da água levaram a maiores aumentos da produção fitoplanctônica na ausência de predação, podendo praticamente triplicar o valor de biomassa inicial para a parametrização utilizada nesta aplicação.



**Figura 3.-** Evolução da biomassa fitoplanctônica para diferentes temperatura da água e sem predação.

Os resultados da terceira aplicação são apresentados na Figura 4. Cada agente apresentado nessa figura representa um cardume de peixes de um dado grupo (zooplancívoro, onívoro ou piscívoro) e, em consequência, com preferências diferentes quanto a predação. Os peixes zooplancívoros procuram seres planctônicos (fito e zoo) que se encontram espalhados no sistema existindo uma dada concentração em cada célula. Os peixes onívoros predam seres planctônicos e peixes zooplancívoros, enquanto que os peixes piscívoros se alimentam dos outros grupos de peixes. Como apenas a percepção de presas e predadores foi ativada nessa simulação, os peixes piscívoros permanecem imóveis até que o campo do índice de adequabilidade de habitat seja alterado ao seu redor pela presença de uma presa, conforme observado em diferentes intervalos de tempo da Figura 4. Os peixes onívoros e zooplancívoros se movimentam continuamente em função da disponibilidade de fitoplankton e zooplankton existente no sistema. No entanto, quando da presença de predadores em células vizinhas, estes são evitados, emergindo um comportamento de perseguição também observado na Figura 4.

É importante ressaltar nos resultados apresentados na Figura 4 que a presença de uma presa e um predador na mesma célula não necessariamente significa a eliminação da presa, pois cada agente representa um cardume vinculado a uma biomassa total resultante de um conjunto de indivíduos. Dessa forma, a pesar da predação, biomassa ainda pode existir no agente. Quando a biomassa chega a zero, nesse instante o agente é eliminado do sistema.

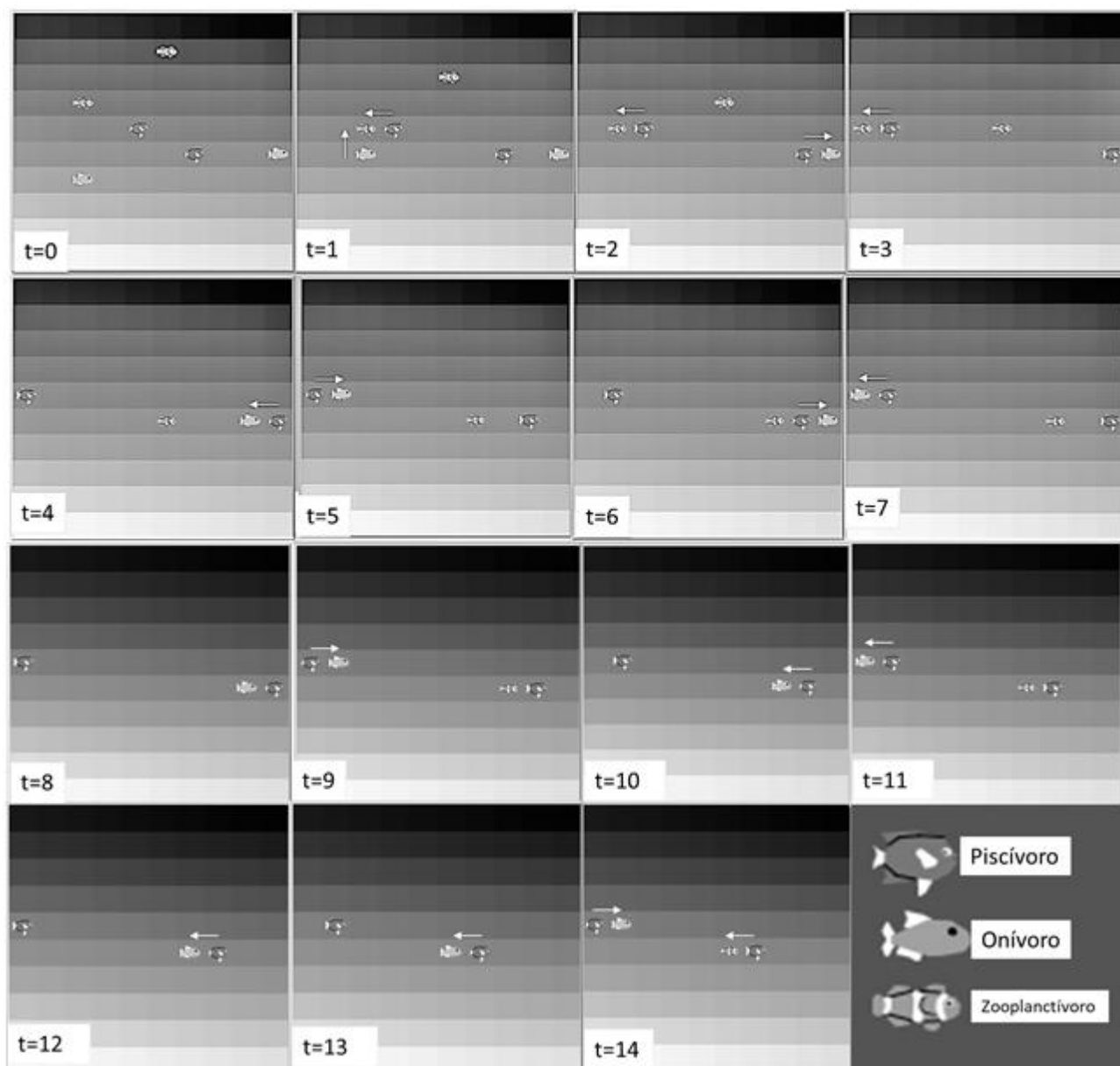


**Figura 4.-** Comportamento presa-predador na simulação da aplicação 3, primeiros seis intervalos de tempo.

Por fim, nas duas últimas aplicações foi testada a influência da escolha do método de cálculo de índice de adequabilidade de habitat. Os resultados são apresentados na Figura 5 (método aditivo) e na Figura 6 (método multiplicativo).

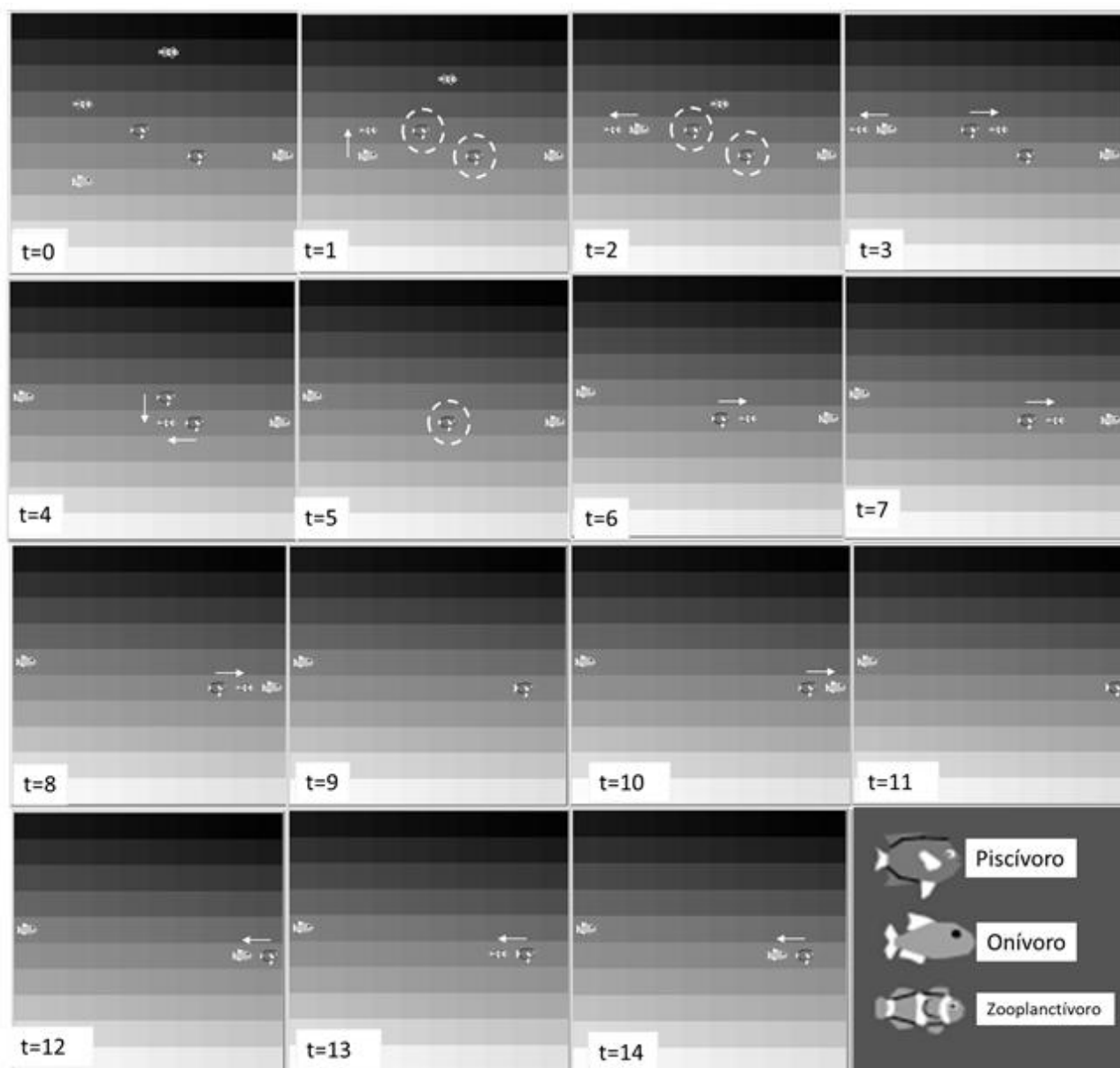
Quando da utilização do método aditivo as respostas funcionais para cada variável consideradas são somadas, e por isto mesmo existindo uma resposta funcional igual a zero (por exemplo, a não existência de presa), o índice de adequabilidade de habitat continua apresentando valores maiores que zero pelas restantes respostas funcionais vinculadas às variáveis do habitat. Diferentemente, quando da utilização do método multiplicativo, qualquer resposta funcional que resulte igual a zero provoca que o índice de adequabilidade de habitat também resulte zero, mantendo os agentes imóveis pela inexistência de gradientes de índices de adequabilidade de habitat entre a célula atual e as células vizinhas.





**Figura 5.-** Resultado da movimentação de peixes em 15 intervalos de tempo quando utilizado o método aditivo na estimativa do índice de adequabilidade de habitat (Aplicação 4).

Da comparação dos resultados apresentados na Figura 5 e na Figura 6, a influência da escolha do método de cálculo do índice de adequabilidade de habitat fica mais evidente nos cardumes de peixes piscívoros. Enquanto na Figura 5 (método aditivo) os cardumes de peixes piscívoros estão em constante movimento em direção à região mais favorável em termos de temperatura da água (região central do sistema) e ao mesmo tempo de disponibilidade de presas, na Figura 6 (método multiplicativo) os cardumes de peixes piscívoros permanecem imóveis até o intervalo de tempo  $t = 4$ . Nesse intervalo de tempo um cardume de peixes zooplanctívoros altera o campo de índices de adequabilidade de habitat dos peixes piscívoros ao passar por célula vizinha à posição atual do cardume de peixes piscívoro. No intervalo de tempo  $t = 5$  da Figura 6 também pode ser observado o agrupamento de cardumes, situação considerada quando do encontro de dois agentes do mesmo grupo de peixes (piscívoros neste exemplo) na mesma célula, sendo estes agrupados em um único agente com biomassa igual à soma da biomassa dos agentes anteriores.



**Figura 6.-** Resultado da movimentação de peixes em 15 intervalos de tempo quando utilizado o método multiplicativo na estimativa do índice de adequabilidade de habitat (Aplicação 5).

## CONCLUSÕES

Foi possível representar com a modelagem baseada em agentes os principais processos do ecossistema aquático, através de uma ferramenta que se mostra didática, de uso público, e fácil de utilizar, com grande potencial de ser utilizada em salas de aula em disciplinas da área de recursos hídricos e ecologia.

As aplicações testadas demonstraram a correta representação dos processos modelados em todos os casos avaliados.

## AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece à UFRGS pela bolsa de iniciação científica concedida. Agradecemos ainda ao CNPq pelo apoio ao projeto de pesquisa no qual este trabalho se insere.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DeAngelis, D.L., Mooij, W.M.** (2005). "Individual-Based Modeling of Ecological and Evolutionary Processes". *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, Vol. 36:1, pp. 147-168.
- Dueri, S., Faugeras, B., Maury, O.** (2012). "Modelling the skipjack tuna dynamics in the Indian Ocean with APECOSM-E: Part 1. Model formulation". *Ecological Modelling*, Vol. 245, pp. 41-54.
- Fernandes, L.F., Bravo, J.M., Ticona, J.C.; Rodrigues, L.R; Marques, D.M** (submetido-2018). "Avaliação visual e numérica da interação entre grupos de indivíduos na modelagem ecológica de comunidades aquáticas". *Engenharia Sanitária e Ambiental*.
- Grimm V., Railsback S.F.** (2005). *Individual-based Modeling and Ecology*. Princeton: Princeton University Press.
- Grimm, V.** (1999). "Ten years of individual-based modelling in ecology: What have we learned, and what could we learn in the future?". *Ecological Modelling*, Vol. 115, pp. 129-148.
- Hellweger, F.L.** (2008). "Spatially explicit individual-based modeling using a fixed super-individual density". *Computers & Geosciences*, Vol. 34, pp. 144–152.
- Scheffer, M., Baveco, J.M., DeAngelis, D.L., Rose, K.A., van Nes, E.H.** (1995). "Super-individuals a simple solution for modelling large populations on an individual basis". *Ecological Modelling*, Vol. 80, pp. 161–170.
- van Nes, E.H., Scheffer, M., van den Berg, M.S., Coops, H.** (2003). "Charisma: a spatial explicit simulation model of submerged macrophytes". *Ecological Modelling*, Vol.159, pp. 103-116.
- van Winkle, W., Rose, K.A., Chambers, R.C.** (1993). "Individual-based approach to fish population dynamics: an overview". *Transactions of American Fisheries Society*, Vol. 122, pp. 397-403.